



Fundamental Study on Efficient Underground Coal Gasification (UCG) by Laboratory Experiments and Small-scale Field Tests

その他（別言語等）のタイトル	室内モデル実験と小規模フィールド試験による効果的な石炭地下ガス化（UCG）に関する基礎研究
著者	SU Faqiang
学位名	博士（工学）
学位の種別	課程博士
報告番号	甲第343号
学位授与年月日	2013-09-26
URL	http://hdl.handle.net/10258/2658

氏名	スー ファーチアン 蘇 發 強
学 位 論 文 題 目	Fundamental Study on Efficient Underground Coal Gasification (UCG) by Laboratory Experiments and Small-scale Field Tests (室内モデル実験と小規模フィールド試験による効 果的な石炭地下ガス化 (UCG) に関する基礎研究)
論 文 審 査 委 員	主 査 教 授 板 倉 賢 一 教 授 永 野 宏 治 教 授 大 平 勇 一

論文内容の要旨

本研究の目的は、室内実験と小規模な現場試験より、リアルタイム制御が可能な効果的な石炭地下ガス化 (UCG) システムを提案することにある。UCG においては、炭層内のき裂進展に伴う燃焼空洞の成長が重要であり、これがガス化の効率や安全性に大きく影響する。すなわち、効果的で環境負荷の少ない UCG システムを確立するためには、ガス化領域の評価と精細な制御が不可欠である。

熱履歴が炭層内の潜在き裂 (炭理) や成層面方向、き裂の進展に与える影響を調べるために、板状と円柱状供試体の加熱実験を行った。石炭供試体の熱破壊過程を監視し、熱履歴を受ける前後の構造変化を調べるために、AE (Acoustic Emission) 計測とマイクロフォーカス 3 次元 X 線 CT を用いた。石炭を加熱すると、熱応力により AE を伴う微小き裂が多数発生した。分析の結果、熱勾配と成層面方向が供試体のき裂発生や進展に大きく影響することが明らかになった。その際、多くのき裂は成層面に沿って発生、進展することがわかった。

次に、ガス化効率やガス化空洞の成長に影響を与える注入ガスなどのパラメータを調べるために、石炭ブロックを用いた UCG モデル実験と、小規模現場試験を行った。ここでは、ガス化の効率とガス化回収エネルギーを評価するために、AE 活動や温度分布の変化、生産ガスの成分濃度等を計測した。また、AE 震源標定とモーメント・テンソル解析によるき裂分布モデルと燃焼空洞周辺画像との比較も行った。その結果、温度変化とき裂進展、および AE 活動との間には、相関が認められた。また、純酸素を供給した際には、安定したガス化が持続し、十分な発熱量 (化学定量的手法による推定) を得ることができた。リンキング方式のモデルでは、平均発熱量として 9.1 MJ/m^3 (室内実験) 以上になり、現場試験では 11.6 MJ/m^3 とな

った。しかしながら、同軸型モデルの場合には、5.8, 2.65, 4.3 MJ/m³ (室内実験) と 6.01 MJ/m³ (現場試験) となり、この違いは、炭層内の成層面方向や燃焼領域の成長の違いにより生じたと考えられる。

一連の室内実験や小規模現場試験の結果を通じて、効果的で安全な UCG システムにおいては、ガス化領域周辺の破壊活動が重要であることがわかった。この結果に基づき、破壊活動を AE 計測により監視し、注入ガスの流量等によりガス化領域の破壊を制御するシステムを提案した。

ABSTRACT

The main purpose of this study is to propose an efficient scheme of underground coal gasification (UCG) under the real-time controlling system, bases on the laboratory and small-scale field studies. In the UCG process, cavity growth with crack extension inside the coal seam is an important phenomenon that directly influences gasification efficiency and safety. An efficient and environmental UCG system relies upon the precise control and evaluation of the gasification zone.

The effects of the feed temperature, direction of the stratified plane, and inherent microcracks (cleats) in coal and crack extension were investigated using some heating experiments performed using plate-shaped and cylindrical coal specimens. To monitor the failure process and measure the microcrack distribution inside the coal specimen before and after heating, acoustic emission (AE) measurements and X-ray CT were applied. It was demonstrated that many microcracks developed inside the coal with AE activity during heating. The temperature gradient and direction of the stratified plane and fire face affect the crack generation and extension, that is, most of the cracks initiated and developed along the stratified plane.

To investigate the influence of gasification agents and operational parameters on cavity growth and gasification efficient, the laboratory UCG model experiments using coal blocks and two small-scale filed tests were conducted. AE activity, temperature profile and product gas composition were obtained for evaluating the gasification effects and gas energy recovery. The crack distribution models by AE source locations and moment tensor analysis are also compared with the cavity images of UCG models. Consequently, positive correlation was found between the temperature variation, crack extension, and

AE activities. It was also concluded that sustained gasification and sufficient gaseous calorific values (estimated by stoichiometric approach) obtained using pure oxygen, that is, the cases of linking-hole UCG yielded average calorific values as high as 9.1MJ/m³ (Lab.), and 11.6 MJ/m³ (Field.). However, the coaxial-hole cases yielded an average calorific value of gas produced as only 5.8, 2.65, 4.3, MJ/m³ (Lab.), and 6.01 MJ/m³ (Field.). It was considered that the difference caused by the growth of combustion zone and the direction of stratified plane.

Through a series of laboratory experiments and field tests, it was found that the fracturing activity around the gasification zone is a key for efficient and safety UCG system. Therefore, the fracturing activity should be controlled by the AE monitoring and the flow rate of injection agents gases in a proposed UCG system.

論文審査結果の要旨

世界の石炭需要は今後益々高まる傾向にあり、未利用石炭の活用や低環境負荷型の活用が求められている。石炭地下ガス化（UCG）は、これらの要求に応える技術である。しかしながら、地盤沈下、地下水汚染、ガス漏洩といった問題点も残しており、どのような炭層に対しても現状の UCG 技術を適用できるわけではない。これらの問題点は、いずれも炭層や岩盤の破壊に起因していることから、本研究では、炭層の破壊に注目して、実時間制御が可能で効率的な UCG システムの確立を目指している。特に、炭層内のき裂進展に伴う燃焼空洞の成長が重要であり、これがガス化の効率や安全性に大きく影響する。第 1 章では、こうした研究背景、目的、意義等が述べられている。

第 2 章では、熱履歴が炭層内の潜在き裂（炭理）や成層面方向、き裂の進展に与える影響を調べるために行った、石炭供試体の加熱実験結果について述べている。供試体が熱履歴を受ける前後の構造変化を AE（Acoustic Emission）計測と X 線 CT で調べた結果、加熱過程で熱応力により AE を伴う微小き裂が多数発生すること、熱勾配と成層面方向が供試体のき裂発生や進展に大きく影響することを明らかにした。

第 3 章では、ガス化効率やガス化空洞の成長に影響を与える注入ガス、注入孔と生産孔を結ぶ連結孔の形態（リンキング方式と同軸方式）による違いなどを調べるために行った、石炭ブロックを用いた UCG モデル実験について述べている。注入ガスとして純酸素を供給した際には安定したガス化を持続し、十分な発熱量を得ている。また、リンキング方式のモデルでは平均発熱量が高く、同軸方式では低い結

果を得た。この違いは、炭層内の成層面方向や燃焼領域の成長の違いにより生じたと考察している。

第4章では、室内 UCG モデル実験と同様の計測を実際の炭層に適用した結果について述べている。リンキング方式と同軸方式の実験を行い、室内実験と同様な結果を得ている。

第5章では、温度変化とき裂進展および AE 活動について考察し、温度変化と石炭破壊の間には、ある温度まで相関関係があることを見出している。また、AE 波形解析によるき裂分布モデルと燃焼空洞周辺画像との比較も行い、燃焼・ガス化領域の成長と移動の過程を可視化し、き裂の方位分布の推定も試みている。

第6章では、一連の室内実験や小規模現場試験の結果から、効果的で安全な UCG システムを確立するにはガス化領域の破壊活動が重要であるため、破壊活動を AE 計測により監視し、注入ガスの流量等により破壊を制御するシステムを提案している。

以上のように、本研究で得られた成果は、資源開発工学やエネルギー工学分野などの発展に寄与するところが大であり、今後、世界中の UCG フィールドで活用が期待される。よって、本論文は博士論文に値すると判断された。